Revista Tecnológica ESPOL, Vol. xx, N. xx, pp-pp, (Diciembre, 2008)

Diseño de Sistema de Calentamiento de Aire y Cámara de Secado para Paja Toquilla por Recuperación de Energía desde Hornos Artesanales de Cocción de la Paja

A. Boero, J. Duque*
Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de Producción (FIMCP)
Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL)
Campus Gustavo Galindo, Km. 30.5 Vía Perimetral
Apartado 09-01-5863. Guayaquil, Ecuador
*jduque@espol.edu.ec

Resumen

Al norte de la provincia Santa Elena, se encuentra el Centro Artesanal de Procesadores de Paja Toquilla; quienes, a través del Programa de Desarrollo de la Península de Santa Elena, solicitaron el diseño de un sistema que acelere el proceso de secado de la fibra, a fin de mejorar la calidad del producto y optimizar el proceso. El diseño térmico y dimensionamiento de los componentes del sistema se efectuó a través de un proceso iterativo, para equilibrar la capacidad de transferencia de calor dada por el arreglo del banco de tubos al interior del horno, y el flujo de calor que se requiere ingresar a la cámara. El tipo de secado se realiza por lotes, por convección directa entre la fibra y el aire; que se calienta por medio de un intercambiador de calor tipo compacto. La forma y tamaño del intercambiador de calor ubicado al interior del horno, están limitadas a las características particulares del mismo. Derivado del proceso de diseño, usando MATLAB se obtuvo un programa de computación para ser aplicado en sistemas similares. Se efectuó un análisis de costos, herramienta en la determinación de la viabilidad de la solución planteada.

Palabras Claves: *paja toquilla, secado, intercambiador de calor.*

Abstract

North of Santa Elena, is placed the Centro Artesanal de Procesadores de Paja Toquilla, who, through the Programa de Desarrollo de la Península de Santa Elena, asked to design a system to expedite the drying process of the fiber, to improve product quality and optimize the process. The thermal design and dimensioning of the components of the system was made through an iterative process, to balance the capacity of heat transfer given by the bank of tubes inside the furnace, and the heat flux is required to enter the drying chamber. The rate of drying is done in batches, through direct convection between the fiber and air, which is heated through a type compact heat exchanger. The shape and size of the heat exchanger located inside the furnace are limited to the particular characteristics of it. Derived from the design process, using MATLAB was a computer program to be implemented in similar systems. It was conducted a cost analysis, tool in determining the feasibility of the designe proposed.

Keywords: *toquilla strow, drying process, heat exchanger.*

1. Introducción

La Comuna Barcelona, ubicada al norte de la provincia de Santa Elena, es uno de los centros más importantes de procesamiento de paja toquilla de la costa ecuatoriana. En este poblado se encuentra el Centro Artesanal de Procesadores de Paja Toquilla El Programa de Desarrollo de la Península de Santa Elena – PDPSE – de la ESPOL ha prestado su colaboración a través del desarrollo de proyectos económicamente viables y ambientalmente sustentables, con el fin de solventar la deficiencia tecnológica existente en el procesamiento de la fibra.

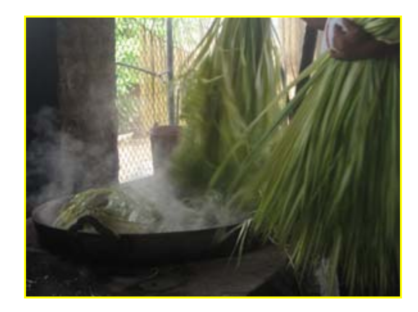


Figura 1. Cocción de los cogollos.

En pruebas realizadas, técnicos del PDPSE determinaron que durante el proceso de secado de la fibra, ésta deberá perder alrededor del 72% de la humedad inicial en 24 horas como tiempo máximo, para evitar la presencia de hongos en el tallo [4].

El propósito principal de este trabajo es proporcionar al CAPPT un prototipo de sistema que acelere el proceso, a fin de asegurar que la fibra alcance el nivel de humedad requerido durante el primer día de secado. Adicionalmente se mejorarían los tiempos de producción, puesto que en la actualidad el secado representa el “cuello de botella” en el procesamiento de la paja toquilla.



Figura 2. Secado de los cogollos (método actual).

Para esto se consideró conveniente recuperar parte de la energía al interior de uno de los hornos artesanales con el fin de calentar agua, que luego circulará por un intercambiador de calor, para aumentar la temperatura del aire que ingresa al secador.

Para la implementación de la alternativa seleccionada es necesario contar con lo siguiente:

- 1 cámara de secado,
- 1 intercambiador de calor agua/aire (radiador),
- 1 ventilador,
- 1 extractor,
- 1 intercambiador de calor entre los gases de combustión y el agua, y
- 1 sistema que conduzca el agua, en un ciclo cerrado, entre el intercambiador de calor ubicado en el horno y el radiador.

2. Metodología

Para el dimensionamiento de los componentes del sistema es necesario realizar un proceso iterativo, con el fin de equilibrar la capacidad de transferencia de calor dada por el arreglo del banco de tubos al interior del horno, y el flujo de calor que se requiere ingresar a la cámara de secado.

Inicialmente se estima el número de cogollos a secar, para luego, a través de cálculos psicrométricos, obtener el flujo de aire necesario para evaporar parte de la humedad que contiene la fibra. El flujo de agua se calcula a través de un balance energético en el radiador.

El dimensionamiento del radiador se basa en configuraciones estándar para este tipo de equipos. Es por esto que para su análisis se seleccionó el método NUT (Número de Unidades de Transferencia), para poder analizar el comportamiento de la configuración seleccionada bajo parámetros diferentes de diseño.

Existen ciertas restricciones en cuanto a la forma y tamaño del intercambiador agua/gases de combustión, debido a las características particulares del horno artesanal, en cuyo interior se ubicará. Con los parámetros establecidos se determina la cantidad de energía que puede suministrar el arreglo de tubos instalados en el horno. Con este valor se calcula el número real de cogollos que puede ser secado. Luego se repasan los cálculos nuevamente para afinar los resultados obtenidos.

3. Discusión y Resultados

El proceso de cocción de una cocción dura 30 minutos; puesto que en un mismo horno se realizan dos y hasta tres cocciones, el proceso total dura aproximadamente un poco más de una hora. Siendo la alternativa seleccionada dependiente de la operación del horno, se fija en una (1) hora el tiempo de secado de la fibra.

El objetivo principal en el diseño de este proyecto es retirar parte de la humedad inicial de la fibra, con el fin asegurar que ésta alcance el contenido de humedad requerido en el primer día de secado. Este valor puede variar desde 72 hasta 10%, en el periodo de 1 hora ya establecido. Para el diseño de este prototipo, se seleccionó 50%; decisión que fue tomada en conjunto con técnicos del PDPSE y los artesanos del CAPPT.

3.1. Cámara de Secado

Como resultado de un proceso iterativo la capacidad del sistema es de 250 cogollos de paja toquilla. Por tanto la cantidad de agua que debe ser evaporada es 21.49 kg/h.

La mejor manera de determinar la temperatura de secado es a través de la experimentación; dado que para el caso de estudio no se dispone de esta información, es necesario estimar este valor a través de la investigación de la literatura técnica [1] [2] [3] [5]. Tomando en consideración la calidad del producto que se quiere obtener, y en comparación a productos que presentan similares características, se fijó la temperatura de secado en 40°C.

Durante el proceso de secado de la paja toquilla el aire atmosférico pasa por tres estados: el aire ambiente (punto 1) incrementa su capacidad de absorber humedad al aumentar su temperatura (punto 2) cuando pasa a través del intercambiador de calor; luego circula a través de los cogollos de paja toquilla, hasta llegar al punto de máxima capacidad de absorbencia de agua (punto 3) con la correspondiente disminución de su temperatura, y finalmente es expulsado por medio de un extractor, colocado en la parte superior del cuarto.

Es necesario determinar los tres puntos que describen el proceso termodinámico que se lleva a cabo al interior de la cámara, para así obtener la cantidad de aire que debe circular. En la tabla siguiente se muestra el resumen de las propiedades que definen estos puntos.

Tabla 1. Propiedades termodinámicas del aire

	Punto 1	Punto 2	Punto 3
Humedad relativa, ϕ	60%	26%	100%
Temperatura, T_{bs} [°C]	25	40	23.6
Humedad específica, ω [Kg H_2O /Kg aire]	0.012	0.012	0.019
Entalpía, h [kJ/Kg]	55.43	70.82	70.82

Con los puntos 1 y 3 se obtiene la cantidad de agua absorbida por el aire, restando los respectivos valores de humedad específica, esto es $\Delta\omega$ = 0.007 Kg H_2O /Kg aire.

La masa psicrométrica de aire que necesita ingresar al secador es

$$\dot{m}_a = \frac{21.49 kg_agua/h}{0.007 kg_agua/kg_aire} = 3222 kg/h.$$

La tasa energética que debe suministrarse para aumentar la temperatura de la fibra de paja toquilla, de 25 a 40 ºC, es decir, el flujo de calor sensible de la paja toquilla Q_m, se obtiene de la siguiente ecuación.

$$Q_m = \frac{m_t \times cp_t (T_d - T_o)}{t} \qquad (1)$$

El cálculo del flujo de calor latente, Q_v obedecerá a la ecuación siguiente.

$$Q_v = \frac{m_t h_{fgw} (H_o - H_f)}{t} \qquad (2)$$

Siendo: h_{fgw} la entalpía de vaporización: 2406.7 kJ/kg agua; H_o y H_f la Humedad inicial y final de la paja toquilla, en kg agua/kg paja toquilla.

El flujo de calor total que se requiere ingresar a la cámara de secado, se obtiene de la suma de los flujos de calor sensible de la paja toquilla y de calor latente para el contenido de humedad, y las pérdidas.

El calor que se pierde al medio ambiente a través de la cámara puede dividirse en:

∗Pérdida a través de las paredes, y

∗Pérdida a través del tumbado

En la Tabla 2 se encuentran las pérdidas definidas en Watios.

Tabla 2. Energía calórica requerida

Parámetro	Unidad	Resultado
Calor sensible de la paja toquilla	KJ/h	313
Calor latente para el contenido de humedad	KJ/h	65041
Pérdida de calor total	KJ/h	538
Calor total	KJ/h	98838

La tabla siguiente resume los resultados obtenidos para la cámara de secado de paja toquilla.

Tabla 3. Resultados del proceso de secado

Parámetro	Unidad	Resultado
Masa de 1 cogollo	g	44.28
Masa inicial de cogollo húmedo	g	171.92
Porcentaje de humedad extraída	%	50

Número de cogollos	-	250
Masa de agua a evaporar total	Kg	21.49
Flujo másico de aire	Kg/h	6540
Caudal volumétrico de aire	cfm	3400

Se seleccionó un intercambiador de calor del tipo compacto en donde se produzca la transferencia de energía entre el agua y el aire, debido a su economía en su construcción y operación.

Especial cuidado debe tomarse al seleccionar las dimensiones del radiador. Las dimensiones fueron inicialmente asumidas y, a través de iteraciones, refinadas hasta obtener los valores, los cuales se ajusten a los requerimientos energéticos y de espacio.

Tabla 4. Dimensiones del Radiador

Ancho, a	26 in	0.66 m
Altura, H	24 in	0.61 m
Número filas en dirección del aire, N_L		3

Se ha seleccionado un ventilador centrífugo para esta aplicación por cuanto éstos presentan una mayor resistencia a la erosión que provoca el polvo en suspensión; adicionalmente pueden tolerar las fluctuaciones de temperatura, así como temperaturas mucho más elevadas que los ventiladores axiales.

La selección del ventilador y extractor, más apropiados para el sistema, en función de los requerimientos de carga y desempeño (Q_a 3400 cfm y SPT = 0.503 in col.H_2O) se efectuó a través de las curvas características de estos equipos, desarrolladas por el fabricante Airprotek S.A. Del catálogo de Equipos Anzola se seleccionó el ventilador centrífugo modelo CB-505 y el extractor del tipo axial, modelo DA-500-8-25°, con un motor de ½ Hp y 1700 rpm.

3.2. Intercambiador de calor agua / gases de combustión

Para el diseño del intercambiador de calor gases de combustión / agua, se ha empleado el método LMTD (*Log Mean Temperature Difference* o Diferencia de Temperaturas Media Logarítmica), puesto que con el conocimiento de las temperaturas de entrada y salida y el flujo másico de los fluidos es posible determinar el área de transferencia de calor.

Dentro de la planta cuentan con tres hornos, de los cuales se ha seleccionado el que opera más horas al día, para que este sistema sea implementado. El referido horno tiene las dimensiones especificadas a continuación, y se muestra en las Figura 3.

Tabla 5. Dimensiones del Horno Artesanal

Ancho (cm)	45
Altura (cm)	36
Profundidad (cm)	90



Figura 3. Vista frontal del Horno.

Como se puede ver existe una limitante en cuanto al espacio en el cual podrá instalarse el intercambiador, y por ende, la configuración, las dimensiones y capacidad de transferencia de calor del mismo. Consecuentemente se dispuso de dos cabezales para el ingreso y salida del fluido de trabajo; los mismos que se ubican hacia las paredes laterales del horno. En la figura que se presenta a continuación se muestra la configuración propuesta para el intercambiador de calor.

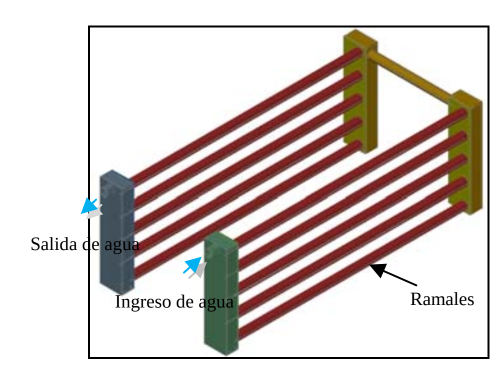


Figura 4. Configuración de Intercambiador de Calor

La capacidad de transferir calor en el dispositivo, está dada por la ecuación siguiente.

$$Q = UA\Delta T_{ml} \qquad (3)$$

donde, la diferencia de temperaturas media logarítmica viene dada a través de la siguiente expresión.

$$\Delta T_{ml} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln(\Delta T_2 / \Delta T_1)} \qquad (4)$$

La determinación del coeficiente global de transferencia *U*, engloba los coeficientes de convección, de conducción, de radiación, además de las resistencias ocasionadas por los depósitos propios de los fluidos en el proceso. Para el caso particular, el coeficiente global de transferencia de calor se deriva del circuito térmico que se presenta a continuación.

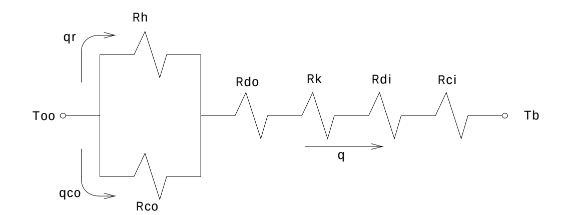


Figura 5. Circuito Térmico.

Siendo:

$$q_{total} = q_{radiación} + q_{convección_externa} \qquad (5)$$

Donde:

R_r = resistencia de radiación,
R_{co} = resistencia de convección externa,
R_{do} = resistencia de incrustaciones externas,
R_k = resistencia de conducción,
R_{di} = resistencia de incrustaciones internas, y
R_{ci} = resistencia de convección interna.

3.2.1. Esfuerzos Térmicos. Los esfuerzos térmicos que se desarrollan si la estructura o un elemento de la misma, está completamente restringido equivalen al producto del coeficiente de expansión lineal, el cambio de temperatura y el módulo de Young del material, como se presenta en la siguiente ecuación.

$$\sigma_T = \alpha(\Delta T)E \qquad (6)$$

Los mayores esfuerzos térmicos ocurren principalmente en los concentradores de esfuerzos; en este caso, en donde se produce la unión del haz de tubos con la placa. Siendo así, se determinó que esta unión sea soldada, puesto que las uniones soldadas de haz y placa son más robustas y confiables que las uniones mandriladas o expandidas [6].

3.2.1. Caídas de Presión. Cuando se diseña intercambiadores de calor, es necesario verificar que la pérdida de presión en los fluidos que intervienen en el proceso no sea mayor que un máximo permitido.

Para hallar la caída de presión del lado de los tubos, es suficiente con tomar un solo tubo y determinar las pérdidas por fricción debidas al paso del fluido por el interior del tubo. A esto debe sumársele las pérdidas menores debido al cambio de dirección del flujo y las entradas, esto es la fórmula siguiente.

$$H_L = \left(f \frac{L}{D} + K_e \right) \cdot \frac{V^2}{2g} \qquad (7)$$

La bomba seleccionada para la circulación del fluido en el proceso debe desarrollar suficiente carga a la capacidad deseada para vencer las pérdidas de fricción causadas por la tubería, conexiones, caída de presión en los intercambiadores de calor y la diferencia de cabezal por altura.

Sumado las pérdidas por fricción en las tuberías, la diferencia de cabezal por altura (2.50 m) y la caída de presión en el radiador, se tiene un cabezal de la bomba, h_b igual a 9.24 m.

3.3. Modelo Computarizado del Sistema

Para la obtención de un programa computarizado de diseño se utilizó el software Matlab.

Al momento de ingresar los datos, éstos son validados. Luego de presionar el botón ‘calcular’, en la parte inferior de la pantalla aparecerán los resultados del sistema.

Los datos que se requieren son: las dimensiones del horno, la temperatura de los gases de combustión, el diámetro del tubo del intercambiador de calor agua /gases de combustión, la configuración interna del radiador, condiciones del aire ambiente, temperatura de secado, masa inicial de la paja toquilla, humedad que se quiere evaporar de la misma, y su temperatura.

Los resultados del programa son: el número de cogollos, dimensiones aproximadas de la cámara de secado, temperaturas del agua a la entrada y salida del radiador, dimensiones de éste, número de tubos y longitud de los mismos para el intercambiador de calor, caudal del aire y la presión estática, el caudal de agua y las pérdidas de cabezal.

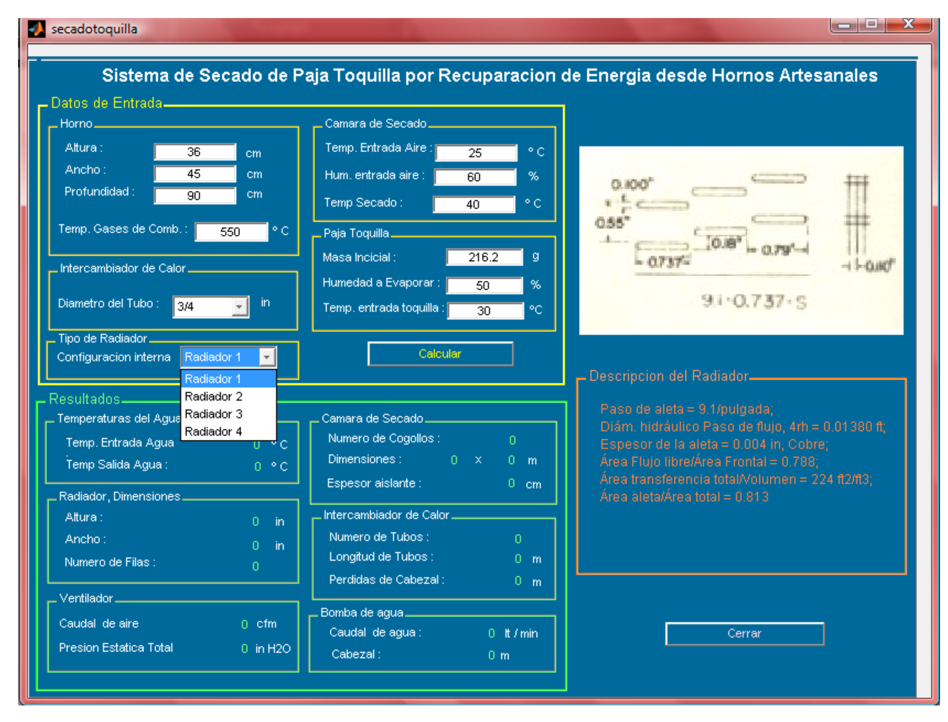


Figura 6. Programa para el Diseño Térmico del Sistema – Entrada de Datos

3.4. Análisis de Costos

El costo total de la construcción e implementación del sistema de calentamiento de aire y cámara de secado para paja toquilla, es igual a la suma del costo de los materiales, manufactura y equipos, tal cual se presenta en la Tabla 5.

Tabla 5. Costo total de implementación

Ítem	**Descripción**	**Costo (USD)**
M.	Materiales	1 308.25
N.	Equipos	1 230.00
O.	Mano de Obra	655.00
	Subtotal	3 193.25
	Impuestos (IVA 12%)	383.19
	Total	**3 576.44**

Los costos de operación son equivalentes al consumo de energía eléctrica del ventilador y la bomba de agua, que son parte de este equipo. Cabe recalcar que no se incluye el costo del combustible usado en el horno, puesto que es un sistema de recuperación de energía dentro del horno.

El consumo de energía eléctrica por mes se obtiene multiplicando la potencia de los equipos por el número de horas que éstos se mantendrán operando. Puesto que en el CAPPT se trabaja un promedio de 12 horas al día, 7 días a la semana, el consumo en kilowatios-hora es igual a: 561.6 kW-h. Siendo la tarifa del kilovatio-hora igual a 0.0831 USD, el costo operativo del sistema al mes es igual a 46.67 USD.

4. Conclusiones

El principal objetivo en el desarrollo de este proyecto, fue el de proveer al Centro Artesanal de Procesadores de Paja Toquilla, un sistema de secado mecánico para la fibra de paja toquilla, lo cual constituye una manera de sobreponerse a las limitaciones impuestas por las temperaturas y la humedad relativa, que ocurren de forma natural debido a las variaciones del clima en el lugar.

La alternativa propuesta es a la vez, sustentable en cuanto al uso de recursos, tiempo y facilidad de operación.

El incremento en la temperatura produce un incremento en la velocidad de secado. Un factor importante que limita la temperatura en el proceso de secado es la calidad que se desea obtener, puesto que a elevadas temperaturas la fibra pierde flexibilidad, lo cual es muy importante en la elaboración de las artesanías.

Para el intercambio energético entre el agua caliente y el aire, antes de que éste ingrese al secador, se seleccionó un intercambiador de calor del tipo

compacto debido a su economía de construcción y operación.

Derivado de los cálculos de diseño del intercambiador de calor agua/gases de combustión, en base a los parámetros establecidos, se determinó que existe un equilibrio entre la cantidad de calor que se desea transferir al sistema de secado y la cantidad de energía que puede transferir el intercambiador de calor.

Del análisis de esfuerzos térmicos del intercambiador de calor agua/gases de combustión se resalta que no se producirán mayores daños debido al diferencial de temperatura que experimentará el banco de tubos durante su operación.

Con la aplicación del programa de computadora propuesto es posible realizar el diseño térmico de un sistema similar, o adaptarlo de acuerdo a nuevos requerimientos de operación.

El costo operativo del sistema de secado de paja toquilla, el cual es asumido por los miembros de la asociación de artesanos, se solventaría con las mejoras en la producción, puesto que se reducirían las pérdidas de producto.

5. Agradecimientos

Se agradece la colaboración de los técnicos del Programa de Desarrollo de la Península de Santa Elena, a los miembros del Centro Artesanal de Procesadores de Paja Toquilla y al Ing. Gonzalo Zabala, por el apoyo a la realización de este proyecto en todas sus fases.

6. Referencias

[1] Antoninho, V.; Marques, D.; Sinicio, R.; Oliveira, D. 1991. *Secado de Granos a Altas Temperaturas*. Chile. Consultado 23 mar. 2008. Disponible en http://www.fao.org/docrep/x5059S/x5059S00.HTM.

[2] Maupoey, P.; Andrés, A.; Barat, J.; Albors, A. *Introducción al Secado de Alimentos por Aire Caliente*. España: Universidad Politécnica de Valencia. 99 p.

[3] Muñoz, F. *Plantas Medicinales y Aromáticas - Estudio Cultivo y Procesado*. MundiPrensa Libros. 345 p.

[4] PDPSE – ESPOL (Programa de Desarrollo de la Península de Santa Elena). 2007. *Datos de la fibra paja toquilla durante el proceso de secado* (Fuente Original) Guayaquil.

[5] Steenbock, W. 2006. *Carqueja: Un remedio vegetal desde las planicies brasileñas.* Bolivia: Center for International Forestry Research.

[6] Tademex. 2007. *Manual Técnico: Parte 4 – Efectos Térmicos.* México. Consultado 19 oct. 08. Disponible en http://www.tademex.com.mx/manualtec.html